

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Moderní prostředky kompenzace**  
**Modern tools for power-factor correction**

2017

Lukáš Slavík

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Lukáš Slavík**

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Moderní prostředky kompenzace.  
Modern tools for power-factor correction.

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor průmyslových a distribučních sítí
2. Možnosti kompenzace jalového výkonu
3. Technické prostředky kompenzace
4. Nová zařízení pro kompenzaci
5. Příklad výpočtu

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Santarius, P.: Elektrické stanice a vedení, Skripta VŠB-TU Ostrava, 1990
2. Hodinka, M.: Přenos a rozvod elektrické energie, SNTL, 1989
3. Trojánek, Z.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách, SNTL 1987
4. Dohnálek, P.: Ochrany pro průmysl a energetiku, SNTL, 1991
5. Normy, firemní literatura, předpisy a technická dokumentace

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Jiří Gurecký**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

**Prohlášení studenta**

*„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“*

V Ostravě dne: 28.4.2017

Podpis studenta: 

### **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Dr. Ing. Jiřímu Gureckému za jeho ochotný přístup a odborné rady při řešení mé bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zaměřuje na základní pojmy kompenzace a jejich použití v průmyslu jak pro nízké, tak i pro vysoké napětí. Dále je teoreticky charakterizován rozbor průmyslových a distribučních sítí. V práci jsou uvedeny nejmodernější typy kompenzačních zařízení. Teoretická část popisuje a vysvětluje jednotlivé druhy kompenzace a účel použití jednotlivých kompenzací. Také jsou zde vysvětleny druhy řízení. V závěru práce je vzorový výpočet zaměřený na hrazenou kompenzaci pro centrální kompenzaci.

## **Klíčová slova**

Jalový výkon, kompenzace jalového výkonu, účinník, kompenzace, kompenzační kondenzátory, regulace, chráněna (hrazená) kompenzace, kompenzační filtry, velmi vysoké napětí, vysoké napětí, nízké napětí;

## **Abstract**

Bachelor thesis focuses on basic concepts of compensation and their usage in industry for both low and high voltage. Then we characterized theoretical analysis of industrial and distribution networks. There are stated latest types of compensation devices. Theoretical part explains various types of compensation and their purpose for compensation. Various types of control are explained next. There is sample calculation focused on protected compensation for central compensation in the end of thesis.

## **Key words**

Reactive power, reactive power compensation, power factor, compensation, compensation capacitor, regulation, protected compensation, compensating filter, very high voltage, high voltage, low voltage

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLU

Symbol	jednotky	Význam symbolu
$U$	V	Napětí
$U_f$	V	Fázové napětí
$U_s$	V	Sdružené napětí
$\Delta U$	V	Úbytek napětí
$I$	A	Proud
$I_j$	A	Jalový proud
$I_{\check{c}}$	A	Činný proud
$I_k$	A	kompenzační proud
$R$	$\Omega$	Odpor
$L$	H	Indukčnost
$C$	F	Kapacita
$P$	W	Činný výkon
$\Delta P$	W	Ztráty
$Q$	var	Jalový výkon
$Q_k$	var	Kompenzační jalový výkon
$S$	VA	Zdánlivý výkon
$X_L$	$\Omega$	Induktivní reaktance
$X_C$	$\Omega$	Kapacitní reaktance
$Z$	$\Omega$	Impedance
$\omega$	$\text{rad s}^{-1}$	Úhlová rychlost
$f$	Hz	Frekvence
$f_0$	Hz	Rezonanční frekvence
$\cos\varphi$	-	Účíník
$\cos\varphi_1$	-	kompenzovaný účíník
$C$	F	Kapacita
$p$	-	Činitel ztlumení

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

### Zkratka

### Význam zkratky

NN

Nízké napětí

VN

Vysoké napětí

VVN

Velmi vysoké napětí



## Obsah

1	ÚVOD .....	11
2	TEORETICKÝ ROZBOR PRŮMYSLOVÝCH A DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ .....	12
2.1	Rozdělení podle napěťové hladiny .....	12
2.2	Rozdělení podle způsobu zapojení .....	12
2.2.1	Paprsková síť .....	13
2.2.2	Okružní síť .....	13
2.2.3	Mřížkově síť .....	13
2.2.3.1	Zjednodušená mřížková síť .....	13
2.2.3.2	Klasická mřížková síť .....	14
2.3	Vedení .....	15
2.3.1	Venkovní vedení .....	15
2.3.2	Kabelová vedení .....	15
2.4	Transformátory .....	16
2.4.1	Uzemnění transformátorů .....	16
3	MOŽNOSTI KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU .....	18
3.1	Princip kompenzace .....	18
3.2	Sériová kompenzace .....	19
3.3	Paralelní kompenzace .....	20
4	TECHNICKÉ PROSTŘEDKY KOMPENZACE .....	23
4.1	Rozdělení kompenzačních zařízení .....	23
4.1.1	Rotační kompenzace .....	23
4.1.2	Statické (výkonové) kondenzátory .....	24
4.2	Způsob kompenzace .....	25
4.2.1	Jednotlivá (individuální) kompenzace .....	26
4.2.2	Skupinová kompenzace .....	26

4.2.3	Centrální kompenzace .....	27
4.3	Chráněná (hrazená) kompenzace .....	27
4.3.1	Návrh chráněné (hrazené) kompenzační sekce .....	28
4.3.2	Kompenzační filtry .....	29
4.4	Řízení kompenzace .....	30
4.4.1	Stupňovité řízení kompenzace .....	30
4.4.1.1	Kontaktní spínání .....	31
4.4.1.2	Bezkontaktní spínání .....	31
4.4.2	Plynulé řízení kompenzace .....	31
5	NOVÉ ZAŘÍZENÍ PRO KOMPENZACI .....	32
5.1	Aktivní filtry .....	32
5.1.1	Paralelní aktivní filtr .....	32
5.1.1.1	Návrh paralelního aktivního filtru .....	33
5.1.2	Sériový aktivní filtr .....	33
5.1.2.1	Návrh sériového aktivního filtru .....	33
5.1.3	Kombinovaný aktivní filtr .....	33
5.1.4	Účinnost filtru .....	34
5.1.5	Využití aktivních filtrů .....	34
5.1.6	Kombinace aktivních filtrů a klasické kompenzace .....	34
6	VÝPOČET .....	35
6.1	Návrh kompenzace .....	35
7	ZÁVĚR .....	39

# 1 ÚVOD

V dnešní době je využití elektřiny podstatnou součástí našeho každodenního života. Díky elektrické energii je možné provozovat domácnosti, sportovní centra a další. Jako každá jiná činnost, tak i provoz energetických sítí se musí regulovat jistými pravidly. Tato pravidla jsou nutná k dosažení co nejúspornějšího provozu těchto sítí, snížení ztrát na minimum a šetření primárních zdrojů užívaných při výrobě elektrické energie, které nejsou neomezené. Hlavní problém při provozu elektrických sítí je přenos tzv. jalového výkonu. Řešení problémů spojené s existencí jalového výkonu, se nazývá kompenzace.

Bakalářská práce je rozdělena do sedmi kapitol včetně Úvodu a Závěru. Druhá kapitola řeší teoretický rozbor průmyslových a distribučních sítí, který je rozdělen podle napěťové hladiny a podle způsobu zapojení, dále jsou vymezeny jednotlivé sítě a to paprskové, okružní a mřížkové. Rovněž je pozornost věnována vedení, které jsou venkovní, kabelové a v neposlední řadě také transformátorům.

Třetí kapitola je zaměřena na možnosti kompenzace jalového výkonu. Ve zmíněné kapitole jsou uvedeny principy kompenzace, a jejich zapojení, které se dále člení na sériovou a paralelní kompenzaci.

Čtvrtá kapitola pojednává o technických prostředcích kompenzace a rozdělení kompenzačních zařízení na rotační kompenzace a statické kondenzátory. V další části je vymezen způsob kompenzace, který je možné kompenzovat třemi různými způsoby a to jednotlivou, skupinovou nebo centrální kompenzací. Dále je definována podstata chráněné kompenzace, návrh chráněné kompenzační sekce a kompenzační filtry. V závěru kapitoly je řešena problematika řízení kompenzace a její rozdělení na stupňovité a plynulé řízení. Stupňovité řízení je dále členěno na kontaktní a plynulé spínání.

Pátá kapitola je věnována novému zařízení pro kompenzaci, kde jsou charakterizovány aktivní filtry, které jsou rozděleny na paralelní, sériové a kombinované aktivní filtry.

Šestá kapitola obsahuje stěžejní část bakalářské práce, a to praktický návrh kompenzace.

## 2 TEORETICKÝ ROZBOR PRŮMYSLOVÝCH A DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ

### 2.1 Rozdělení podle napěťové hladiny

- Velmi vysoké napětí:

Sítě velmi vysokého napětí jsou provozovány standardně v oddělených systémech příslušných jednotlivým transformátorům 400/110 kV s maximálně možným zkruhováním jednotlivých síťových celků. Rozpojovací místa jsou vybírána tak, že z hlediska ztrát se způsob provozu sítě 110 kV blíží paralelnímu chodu.

- Vysoké napětí:

Vysokonapěťovou soustavu v České Republice je možné s ohledem na charakter provozu rozdělit na distribuční soustavy s napěťovými hladinami 10, 22, (35) kV a dále na soustavu průmyslovou s napětím 6, 10 a 15 kV.

- Nízkého napětí:

Sítě nízkého napětí jsou navrhovány s ohledem na charakter napájeného objektu nebo oblasti, ve které se nachází. Tyto oblasti požadují odlišnou velikost požadovaných výkonů a míru důležitosti zajištění dodávky elektrické energie. Uvedené rysy pak rozhodují nejen o dimenzování jednotlivých částí sítě, ale také o jejich uspořádání a způsobu připojení odběrů.

### 2.2 Rozdělení podle způsobu zapojení

Máme dva základní způsoby uspořádání sítě:

- otevřený rozvod
- uzavřený rozvod

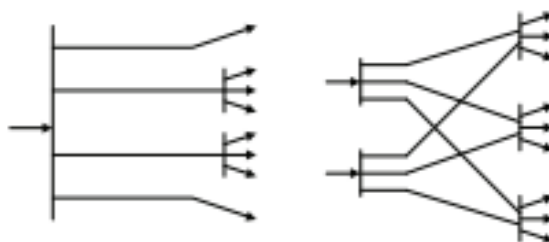
Kde otevřený rozvod dodává elektrickou energii ke spotřebiči jednou cestou. Způsoby zapojení jsou: paprskový rozvod a průběžný rozvod. U uzavřeného rozvodu je spotřebič napájený vždy ze dvou nebo více stran. Způsoby zapojení uzavřeného rozvodu jsou okružní rozvod a mřížová síť. Volba vhodného druhu rozvodu záleží na způsobu provozu řešené soustavy, jak z hlediska rozdělování výkonu, tak i z hlediska bezpečnosti a hospodárnosti. [1]

Tab. 2.1 Rozdělení sítí podle jednotlivých napěťových úrovní

vvn	110kV	okružní, paprskový
vn	22kV, 35kV	Průběžný, paprskový, dvojpaprskový (obvykle spojení do okružního)
	10kV	
	6kV	
nn	400/230V	Průběžný, paprskový, mřížová síť

### 2.2.1 Paprsková síť

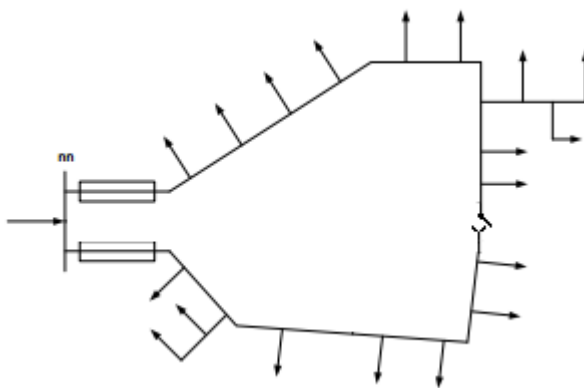
Vedení vychází z transformovny nebo spínacích stanic a zásobuje jednotlivé odběry. Vývody nelze vzájemně spojovat. Paprskové zapojení je nejlevnější, ale jistota dodávky je nejmenší. Používá se v malých městech, vesnicích a v průmyslu. [9]



Obr. 2.1 Paprsková síť, paprskový (vlevo), dvojpaprskový (vpravo) [9]

### 2.2.2 Okružní síť

Okružní síť může být v provozu rozepnutá nebo sepnutá. Jednotlivé paprsky nebo polosmyčky jsou vždy vedeny tak, aby se daly sepnout do uzavřených smyček. Většinou se tedy jedná o síť paprskové. Při poruše vedení lze postižený obvod přepnout na vývod sousední. To lze udělat buď ručně, nebo automaticky. Okružní sítě jsou dražší než paprskové, protože pro spojení je třeba větších délek vedení. [9]



Obr. 2.2 Okružní síť [9]

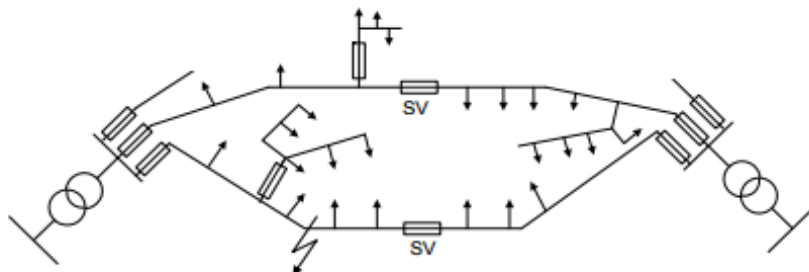
### 2.2.3 Mřížkově síť

Nejčastěji se používají u nn kabelových sítí, ve výjimečných případech i u vn sítí.

#### 2.2.3.1 Zjednodušená mřížková síť

Zjednodušená mřížková síť je možná tehdy, pracují-li alespoň dva transformátory na společné síti. Mezi těmito transformátory je spojení hlavními vedeními s většími průřezy, a jsou jištěny výkonovými pojistkami. Ve vhodných místech hlavních vedení jsou slabší pojistky zvané pojistky slabé vazby (SV). Podle zkušeností i zkoušek v reálném provozu má být poměr jmenovitých proudů pojistek hlavních

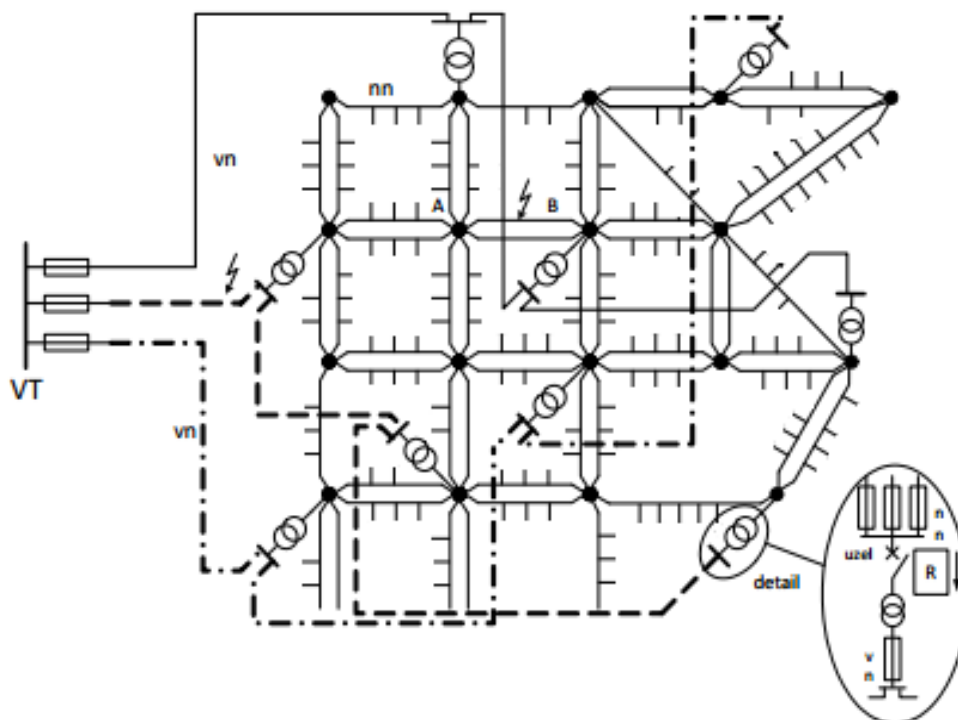
k pojiskám slabé vazby 2 : 1. Vyskytne-li se zkrat např. v naznačeném místě sítě, reaguje nejprve pojistka slabé vazby SV a teprve v dalším okamžiku hlavní pojistka. Zbytek sítě zůstává v provozu. Zjednodušená mřížková síť reaguje na závady na straně nn, nikoliv na straně vn. [9]



Obr. 2.3 Zjednodušená mřížková síť [9]

### 2.2.3.2 Klasická mřížková síť

Klasické mřížkové sítě nn se vždy používají ve větších městech s měrnou hustotou 1 MW/km a více, kde je několik transformoven napájených nejméně dvěma, nejlépe třemi až pěti napáječi vn. Kabelové vedení nn se spojí v křižovatkách ulic do uzlu. Jsou to skříně s pojistkami zazděné na vhodných místech ve zdech domů nebo umístěné do samostatných pilířů. Z charakteristiky pojistek je jasné, že se pojistky na porušeném vývodu přetaví za tak rychlý čas, že ostatní pojistky zůstanou neporušeny. Vyřadí se díky tomu z provozu pouze porušený úsek. [9]



Obr. 2.4 Klasická mřížková síť [9]

## 2.3 Vedení

Elektrické vedení je základním prvkem jak přenosových, tak i distribučních sítí, a to buď venkovním vedením nebo kabelovým vedením, jimiž jsou propojeny jednotlivé transformátory a odběratelé elektrické energie. Využití kabelového či venkovního vedení je z velké části závislé na technických a ekonomických podmínkách, a také na stanovených požadavcích na bezpečnost i spolehlivost provozu vedení.

### 2.3.1 Venkovní vedení

Venkovní vedení jsou převážně holé vodiče, které jsou vedeny nad terénem. Tyto vodiče se používají tam, kde je pro ně dostatek prostoru. Při výstavbě nových vedení jsou upřednostňovány, přestože jejich náklady na chod a údržbu jsou vyšší než u kabelových vedení, ale pořizovací náklady jsou nižší.

- Kabelové vedení VVN:

Vedení 110 kV, které slouží k přenosu velkých výkonů z místa propojení s přenosovou soustavou do míst s velkou koncentrací spotřebitelů. Délka vedení může činit i několik desítek kilometrů a tato vedení musí být vysoce spolehlivá.

- Kabelové vedení VN:

Vedení 22 kV se využívají pro přenos elektrické energie do center její spotřeby, jako jsou průmyslové oblasti a města. Vedení vn dosahují kratších délek než vedení vvn, avšak jsou daleko hustější. Jak u vvn tak i vn vyžaduje vysokou spolehlivost dodávky.

- Kabelové vedení NN:

Nejnižší hladina napětí používaná v naší rozvodné soustavě je 400/230 V. Pro vedení nn se používají holé vodiče AlFe, izolované vodiče nebo závěsné kabely. Nové venkovní sítě nn se budují zejména v malých obcích tam, kde by se při pokládání zemních kabelů muselo počítat s velkými technickými potížemi a bylo by to finančně náročné.

### 2.3.2 Kabelová vedení

Kabelová vedení se používají v místech, kde nelze z prostorových a bezpečnostních důvodů použít vedení venkovní. Tato vedení mají pořizovací náklady oproti venkovním vedením výrazně vyšší. Výhodou je, že mizí sloupky venkovního vedení a komunikační sítě. Kabelové sítě dělíme podle napěťových hladin.

- Kabelové vedení VVN:

Vedení velmi vysokého napětí se díky vysokým investičním nákladům a jejich technické náročnosti používají zřídka. Můžeme se s nimi setkat v oblastech, které je nutné zásobit velkými výkony, jedná se tedy především o průmyslové zóny. Umístění kabelového vedení 110 kV je realizováno většinou v tunelech. Málokdy se vyskytují instalace kabelových vedení 110 kV ve volném terénu.

- Kabelové vedení VN a NN:

Kabelová vedení vn a nn se stala obvyklou součástí systému zásobování větších měst, kde jsou kabely na hlavních trasách měst vedeny především v podzemí. Kabelová vedení se většinou ukládají do země s pískovým ložem nebo jinou mechanickou ochranou. Skladba použitých typů kabelů je velice různorodá, protože úplná výměna kabelů za nové není z hospodářského hlediska snadná. Proto se můžeme setkat i se staršími kabely, které jsou s papírovou a olejovou izolací nebo s izolací termoplastickou.

## 2.4 Transformátory

Transformátor je elektrický netočivý stroj sloužící k přenosu elektrické energie. V elektroenergetické soustavě se transformátory nejčastěji používají pro změny napětí v elektrických sítích.

Transformátory rozdělujeme podle:

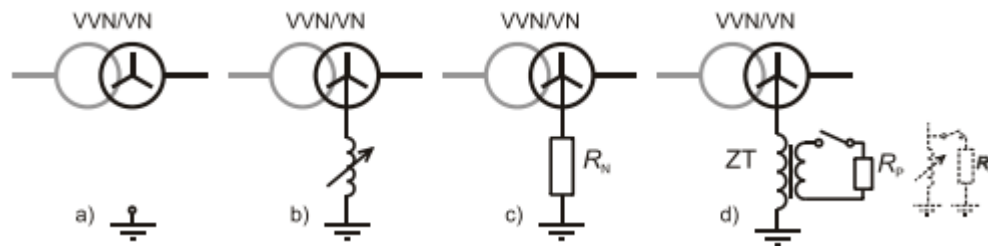
- převodu – snižovací, zvyšovací, oddělovací,
- soustavy – jednofázové a vícefázové,
- chlazení – olejové, vzduchové
- účelu – průmyslové, distribuční, vlastní spotřeby, blokové, izolační.

Transformátory průmyslové distribuční nebo transformátory vlastní spotřeby napájí vnitřní rozvody objektů, jsou to transformátory s výstupním napětím VN nebo NN, trojfázové. [1,2]

### 2.4.1 Uzemnění transformátorů

Transformátor z vvn na vn má své varianty uzemnění uzlu a je vhodná pro určitý provoz, jako je průmyslový provoz. Značná část distribučních soustav je v České Republice provozována jako kompenzační a je nejobvyklejší variantou přepínání odporů na sekundární straně zhášecí tlumivky. U průmyslových a elektrárenských provozů je možno najít různé varianty způsobu uzemnění. Tak například blokové transformátory vlastní spotřeby jsou provozovány jako izolované a transformátory společné vlastní spotřeby jsou zpravidla nepřímě uzemněné přes indukčnost a v rozvodnách odsíření elektrárenských provozů je pak běžný způsob uzemnění soustavy přes odporník. [1,2]





*Obr. 2.5 Druhy uzemnění transformátoru pro síť VVN/VN [2]*

Na obr. 2.5 jsou druhy izolovaných transformátorů:

- a) izolovaný uzel
- b) nepřímo uzemněné přes uzlový odporník
- c) nepřímo uzemněné přes zhášecí tlumivku
- d) klasická laděná zhášecí tlumivka s případným přepínáním pomocného odporníku pro navýšení činné složky poruchového proudu na sekundární straně nebo příležitostně na straně primární. Tzv. „maďarský“ odporník

### 3 MOŽNOSTI KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU

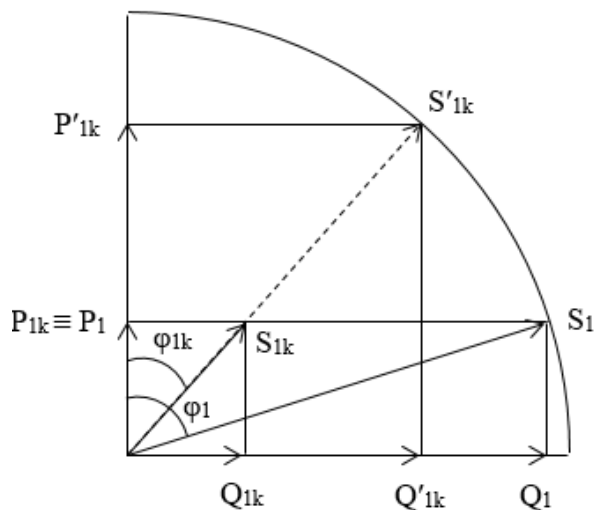
#### 3.1 Princip kompenzace

Zmenšení jalového proudu indukčního charakteru kapacitním proudem pro zkvalitnění a zúspornění přenosu elektrické energie se obecně nazývá kompenzací.

Kompenzace musíme rozlišit podle jejich aplikace v jednotlivých napěťových stupních. Hlavně jde o kompenzaci v sítích nízkého napětí a poté v sítích vysokého napětí. V sítích velmi vysokého napětí jsou to spíše otázky provozní, které rozhodují o problematice přenosu jalového výkonu. Při celkové bilanci výkonů v jednotlivých odběrových uzlech není tak rozhodující účinník odběru jako velikost požadovaného jalového výkonu.

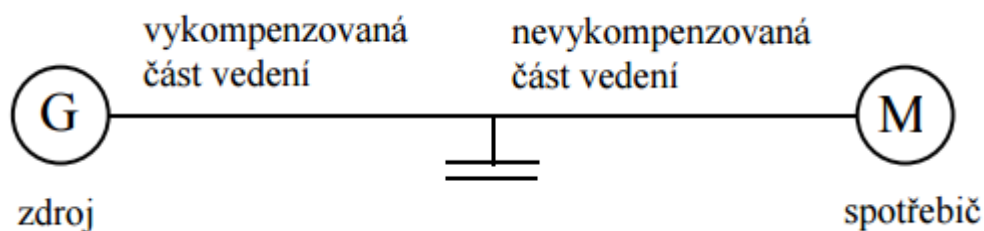
Prostředky kompenzace můžeme rozlišit do dvou druhů, a to na statické (kondenzátory) a točivé (synchronní kompenzátory a synchronní stroje). Pro posouzení vhodnosti již zmíněných druhů kompenzace je třeba vždy provést podrobnou analýzu podle výkonové skladby a provozních podmínek připojovaného zařízení, jakož i podle místní situace a požadavků na připojení konzumu na elektrizační soustavu.

Pořízení kompenzace má jednu základní podmínku, aby úspora byla vyšší než náklady na celou kompenzaci. [3,4]



Obr. 3.1. Fázový diagram stanovení kompenzačního výkonu [3]

Z obr. 3.1 vidíme dvojí možný účinek kompenzace. Buď dané vedení zatěžíme totožně jako před kompenzací, a pak je zatížen proudy odpovídajícím zdánlivému výkonu  $S_{1k}$ , nebo je možné daný rozvod při požadovaném účinníku  $\varphi_{1k}$  zatížit plným zdánlivým výkonem  $S'_{1k} = S_1$ . Tak získáme zvýšení odebíraného činného výkonu z  $P_1$  na  $P'_{1k}$ . V tom případě nelze s poklesy úbytků napětí a ztrát v rozvodu počítat. [3]



Obr. 3.2. Vliv kompenzace [6]

Na obr. (3.2) je patrné, že vliv kompenzace se projevuje mezi zdrojem a místem připojení kompenzačního zařízení. Účinník spotřebiče se při kompenzaci nezmění.

Činná a jalová složka proudu:

$$I_{\xi} = I \cos \varphi \quad [\text{A}] \quad (3.1)$$

$$I_j = I \sin \varphi \quad [\text{A}] \quad (3.2)$$

Zdánlivý výkon:

$$S = UI = \sqrt{P^2 + S^2} \quad [\text{VA}] \quad (3.3)$$

Činný výkon:

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi = UI_{\xi} \quad [\text{W}] \quad (3.4)$$

Jalový výkon:

$$Q = S \sin \varphi = UI \sin \varphi = UI_j \quad [\text{var}] \quad (3.5)$$

Účinník:

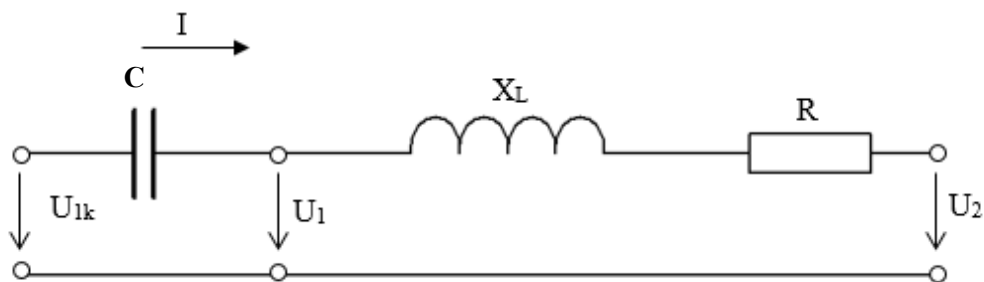
$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{UI_{\xi}}{UI_j} = \frac{I_{\xi}}{I_j} \quad [-] \quad (3.6)$$

Z obr. (3.1) plyne zjednodušený výpočet kompenzačního výkonů:

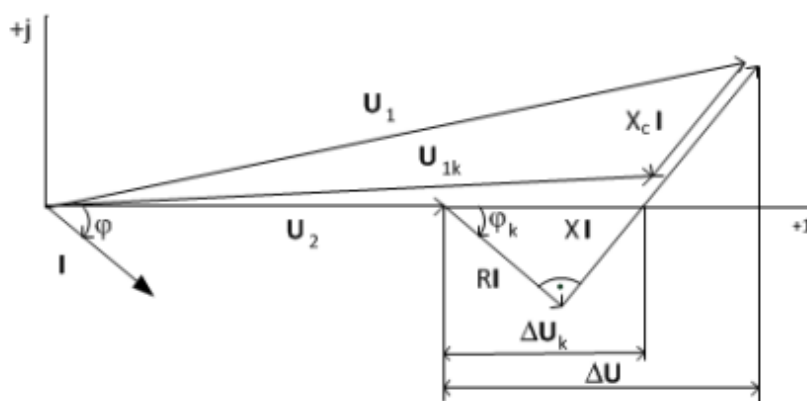
$$Q = P_1 (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_{1k}) \quad [\text{var}] \quad (3.7)$$

### 3.2 Sériová kompenzace

Jedním ze základních způsobů kompenzace jalového výkonu je sériová kompenzace vytvořená pomocí kondenzátoru do série s vedením, který je vhodný pro svářečské a elektrické vedení pro přirozenou stabilizaci napětí. Pozitivem u této metody je vyšší přenosová kapacita a nižší jalová spotřeba. Problém se vyskytuje ve zkratovém poměru na vedení. Především se využívá u kompenzace krátké cesty například u obloukových pecí. [3,4]



Obr. 3.3. Náhradní schéma sériové kompenzace



Obr. 3.4. Fázový diagram sériové kompenzace

Úbytek na vedení bez kompenzace:

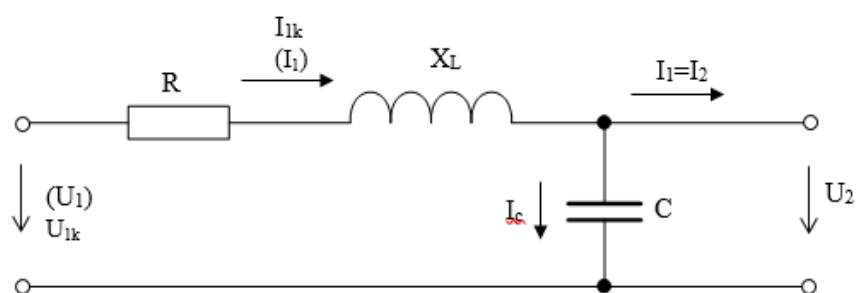
$$\Delta U_1 = I_{\xi} R + I_j X_L \quad [\text{U}] \quad (3.1)$$

Po kompenzaci:

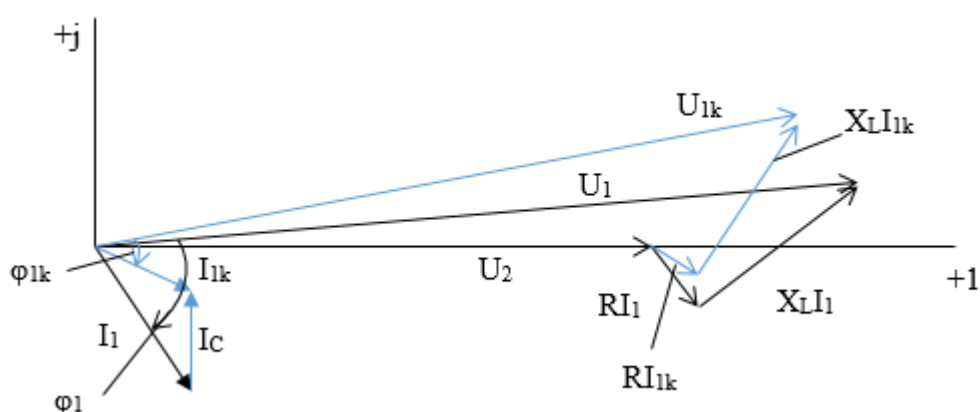
$$\Delta U_{1k} = I_{\xi} R + I_j (X_L - X_C) \quad [\text{U}] \quad (3.2)$$

### 3.3 Paralelní kompenzace

Druhým typem kompenzace, který je nejčastěji využíván, je kompenzace paralelního výkonu. V síti máme dva typy proudů: činný a jalový. Každé zařízení musí být konstruováno na proud zdánlivý, který je vektorovým součtem proudů. Činný proud, který zařízení odebírá ze sítě, je pevně daný konstrukcí zařízení. Jalový výkon a jemu příslušný jalový proud však ovlivnit lze a pomůže se tím k tomu, aby celkový zdánlivý proud procházející od zdroje ke spotřebiči byl nižší. Dosáhneme tak menších ztrát na vedení a úbytků napětí. [3,4]



Obr. 3.5. Náhradní schéma paralelní kompenzace



Obr. 3.6. Fázový diagram paralelní kompenzace

Při kompenzaci se změní proud z hodnoty  $I_1$  na hodnotu  $I_{1k}$  a fázové posunutí proudu a napětí z původní hodnoty  $\varphi_1$  na hodnotu  $\varphi_{1k}$ . Poněvadž činná složka proudu zůstane stejná, tak platí [3,4]

$$I_1 \cos \varphi_1 = I_{1k} \cos \varphi_{1k} \quad (3.3)$$

Z předchozího vzorce (3.3) můžeme vidět, že celkový proud klesne na hodnotu:

$$I_{1k} = I_1 \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_{1k}} \quad [A] \quad (3.4)$$

Zmenšení úbytku napětí zjistíme z předchozího vzorce (3.1):

$$\Delta U_{1k} = I_C R + (I_j - I_C) X_L \quad [A] \quad (3.4)$$

Ztráty na vedení před kompenzací:

$$\Delta P_1 = I_1^2 R \quad [W] \quad (3.5)$$

Ztráty na vedení po kompenzaci:

$$\Delta P_{1k} = I_{1k}^2 R \quad [\text{W}] \quad (3.6)$$

Snížení ztrát vedení vyplývá z předchozích vzorců (3.6) a (3.7):

$$\Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_{1k} = I_1^2 R - I_{1k}^2 R \quad [\text{W}] \quad (3.7)$$

## 4 TECHNICKÉ PROSTŘEDKY KOMPENZACE

### 4.1 Rozdělení kompenzačních zařízení

V této kapitole se budou charakterizovat rozdíly mezi rotačním a statickým zařízením.

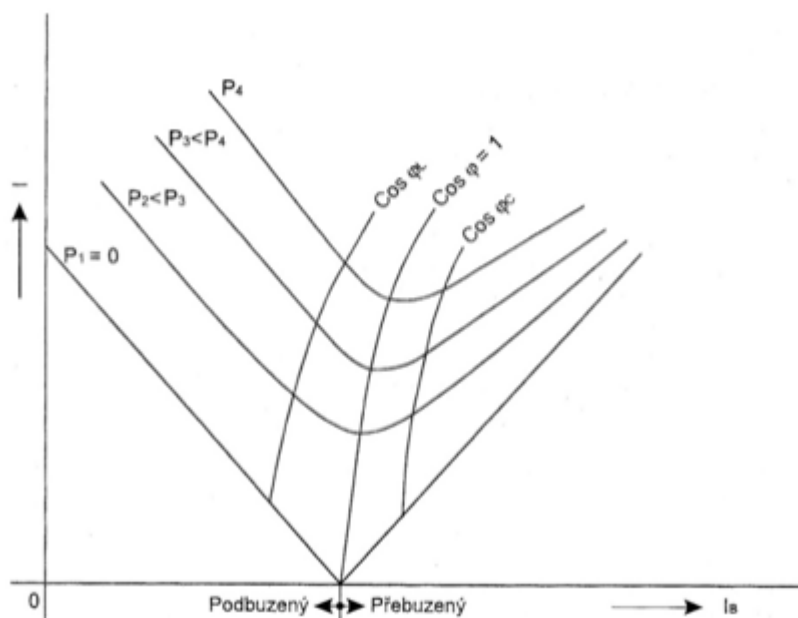
#### 4.1.1 Rotační kompenzace

Rotační kompenzační zařízení můžeme využívat jako:

- Synchronní generátor
- Synchronní motor
- Synchronní kompenzátor
- Synchronní konvektor
- Středofrekvenční alternátor

Rotační kompenzátory jsou synchronní motory pracující buď s mechanickým nebo bez mechanického zatížení. Jsou charakterizovány tím, že budícím vinutím můžeme měnit dodávku jalové energie pomocí napojení na zdroj stejnosměrného proudu. Změnou jeho buzení se jalová energie mění a moment zůstane stabilní při stálém napájecím napětí a kmitočtu.

Na obr. 4.1 jsou znázorněny v-křivky závislosti synchronního stroje statorového proudu na proudu budícím, kde pro rotační kompenzace bez mechanických zátěží platí křivka  $P=0$ . Podbuzený a přebuzený stav je v obrázku vymezen křivkou  $\cos(\varphi) = 1$ . [6]



Obr. 4.1 V-křivky synchronního stroje [2]

Do podbuzeného stavu se dostaneme pomocí snižování budicího proudu, když stroj ze sítě odebírá jalový výkon. Zvětšením budicího proudu se stroj bude chovat jako kapacita a dodávat jalový výkon.

Před zprovozněním synchronních strojů je nutné opatřit budicí obvod vhodným regulátorem budicího proudu, který bude schopen zajistit požadované změny jalového výkonu v závislosti na měnící se zátěži. Tato změna zátěže může být velice rychlá. V těchto případech, přestože použijeme rychlý regulátor, jako je například řízený usměrňovač, nedosáhneme požadovaných výsledků. Vždy bude požadovaná změna jalového výkonu doprovázena zpožděním. Synchronní motor není schopen okamžitě měnit své vlastnosti a při náhlých změnách dodává kompenzační výkon v době, kdy ho již není potřeba a naopak. Z tohoto důvodu není vhodné používat synchronní kompenzátor v aplikacích s dynamicky se měnící zátěží, jako jsou například obloukové pece.

Synchronní stroje jsou převážně používány v přenosových a rozvodných sítích na hladině vysokého a velmi vysoké napětí jako prostředek pro kompenzaci jalových výkonů, ale také k regulaci napětí a udržení stability sítě. Do sítě jsou zapojovány pomocí transformátoru se třemi vinutími. Na rozdíl od kondenzátorů se u synchronních kompenzátorů při poklesu napětí zvyšuje odebíraný kapacitní jalový výkon, tím se zmenšuje úbytek napětí v síti a napětí se udržuje.

Vzhledem k pohybujícím se velkým výkonům 1 až 15Mvar a pomalejší regulaci jalového výkonu oproti jiným kompenzačním zařízením se především používají jako centrální kompenzace. Připojovací napětí synchronních kompenzátorů je obvykle 6 kV a k rozvodnám o vyšším napětí jsou připojovány přes transformátor.

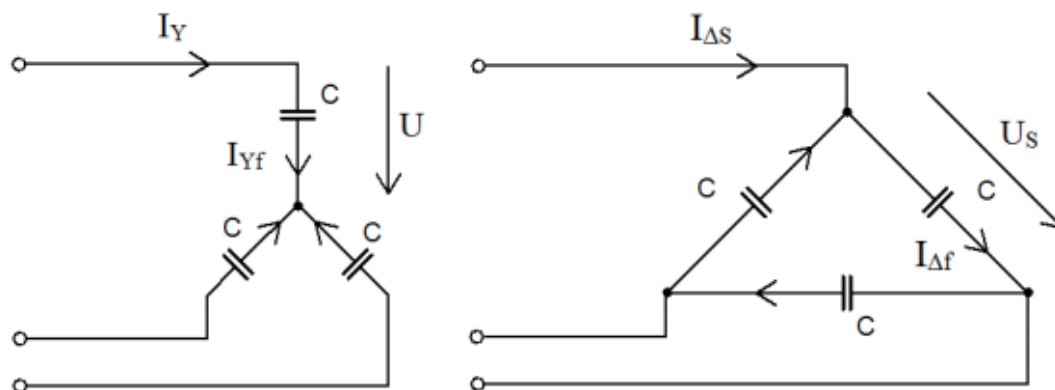
Kompenzace pomocí synchronních strojů je v dnešní době v útlumu, kvůli spotřebě činné energie, vyšším nárokům na údržbu a v neposlední řadě z důvodu vyšších nároků na obestavěný prostor. [6]

#### 4.1.2 Statické (výkonové) kondenzátory

Kondenzátorové baterie slouží pro kompenzaci jalového výkonu induktivního charakteru v sítích nízkého a vysoké napětí. U nízkého napětí se používá především paralelní zapojení. Nejčastěji se používají výkonové kondenzátory pro frekvenci 50 Hz. Ztráty činného výkonu nejsou tak velké, jako u rotačního kompenzátoru. Nevýhodou je změna kompenzačního výkonu, která je v klasickém provedení možná pouze skokovou regulací.

Máme dvě základní možnosti zapojení kondenzátorových baterií do třífázových soustav.

- Zapojení do hvězdy
- Zapojení do trojúhelníku



Obr. 4.2 Zapojení do hvězdy (vlevo) a do trojúhelníku (vpravo)



Po úpravách vzorců (4.4) a (4.6) je patrné, že při stejné kapacitě vyjdou rozdílné výkony.

Při zapojení jednofázových kondenzátorů je velikost jalového výkonu  $Q_c$ :

$$Q_c = U^2 \cdot \omega \cdot C \quad [\text{var}] \quad (4.1)$$

Také víme, že platí:

$$Q_c = U \cdot I \quad [\text{var}] \quad (4.2)$$

Z  $\omega$  vyplývá:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad [\text{var}] \quad (4.3)$$

Po úpravě:

$$Q_c = \frac{I^2}{\omega \cdot C} \quad [\text{var}] \quad (4.4)$$

Zapojení třífázových kondenzátorů **do hvězdy**:

$$Q_c = 3 \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C \quad [\text{var}] \quad (4.5)$$

Dále:

$$Q_c = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad [\text{var}] \quad (4.6)$$

Po úpravě:

$$Q_c = \frac{3 \cdot I^2}{\omega \cdot C} \quad [\text{var}] \quad (4.7)$$

Zapojení třífázových kondenzátorů **do trojúhelníka**:

$$Q_c = 3 \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C \quad [\text{var}] \quad (4.8)$$

Dále:

$$Q_c = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad [\text{var}] \quad (4.9)$$

Po úpravě:

$$Q_c = \frac{I^2}{\omega \cdot C} \quad [\text{var}] \quad (4.10)$$

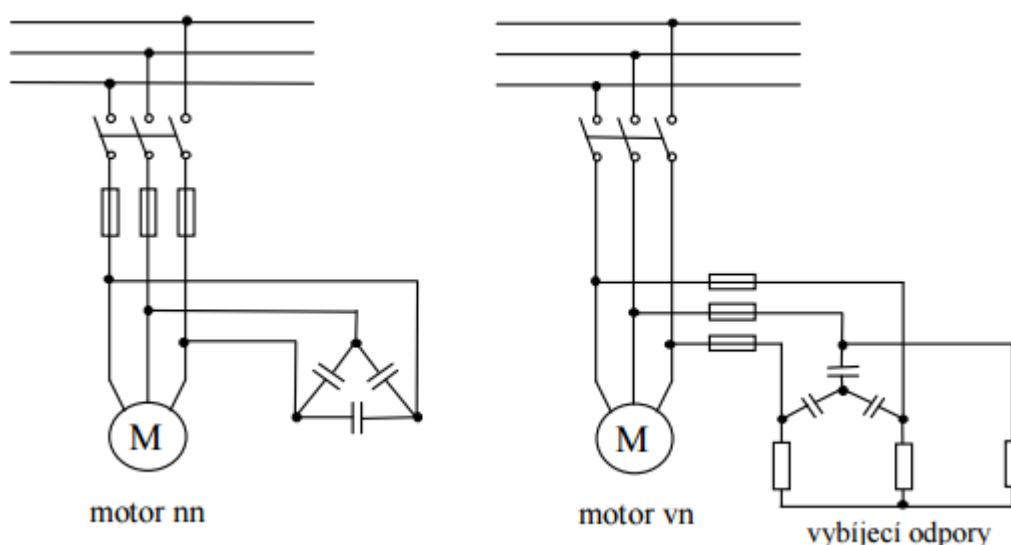
## 4.2 Způsob kompenzace

Jsou tři základní způsoby, jak kompenzovat paralelní indukovaný výkon. Prvním způsobem je kompenzace jednotlivých spotřebičů neboli individuální kompenzace. Druhým typem kompenzace je několik spotřebičů dohromady, tedy skupinová kompenzace a posledním řešením je celou dílnu kompenzovat dohromady, tedy centrální kompenzace. [5, 7]

### 4.2.1 Jednotlivá (individuální) kompenzace

Jednotlivé kompenzace se dosáhneme, opatří-li se každý připojený motor či indukovaný spotřebič svou vlastní kondenzátorovou baterií. Kompenzace v takovém případě je účinná, neboť se kondenzátor zapíná i vypíná zároveň s motorem. Jednou z výhod je, že jalová složka proudu není zatěžována přírodním vedením. Další výhodou je, že odpojením vypínače zůstává kondenzátor připojený k motoru a vybíjí se přes jeho vinutí. Všechny kondenzátory se musí zajistit náležitou ochranou.

Kondenzátory pro nízké napětí se samostatně nejistí, ale jsou jištěny společně se zařízením (motorem). Kondenzátory vysokého napětí se připojují na začátku odbočky a jsou opatřeny vlastním jištěním a vybíjecími rezistory. Pro jištění kondenzátorů se používají pojistky, které mají 1,5 až 2,5krát větší proud kondenzátorů.



Obr. 4.3. Připojení kompenzačních kondenzátorů k motoru nn a vn [7]

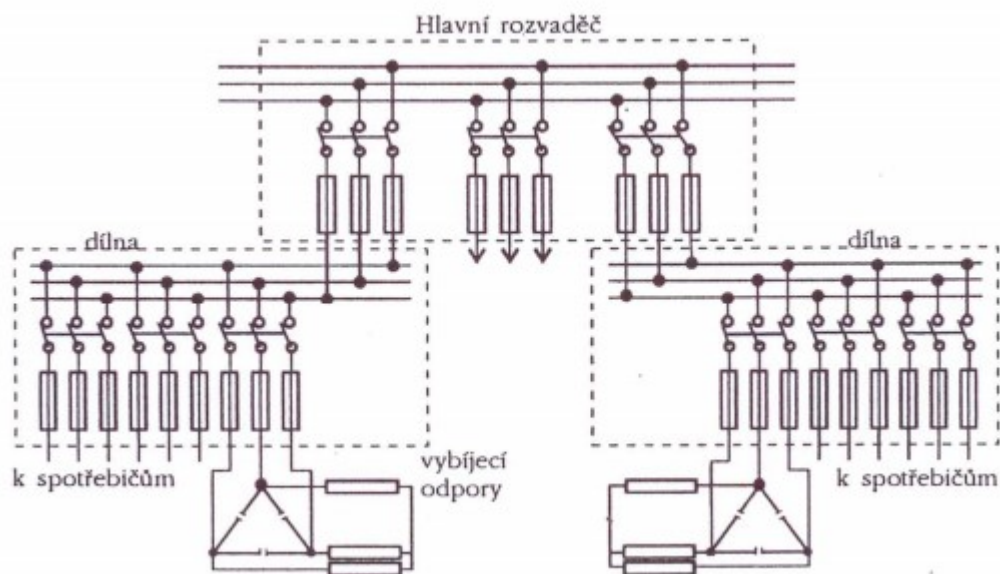
Každý jednotlivý indukovaný spotřebič se kompenzuje alespoň tak, aby ze sítě neodebíral induktivní výkon naprázdno. [3,5,7]

### 4.2.2 Skupinová kompenzace

U tohoto typu se kompenzují podružné rozvaděče.

Výhodou skupinové kompenzace je menší kapacitní výkon ve srovnání s individuální kompenzací. Důvodem je, že kondenzátor se navrhuje na výpočtové zatížení skupiny spotřebičů, tedy s respektováním činitelů náročnosti jednotlivých spotřebičů ve skupině. Celá baterie kondenzátorů je umístěna a také chráněna proti nebezpečnému dotyku pouze na jediném místě, a to je další výhodou.

Nevýhodou je ovšem skutečnost, že k regulaci je potřeba přístrojová výzbroj, která řídí zapínání a vypínání kondenzátorové baterie. Aby kondenzátory po vypnutí nezůstaly nabité, je potřeba vybíjecí odpor, což je další nevýhodou. [5]

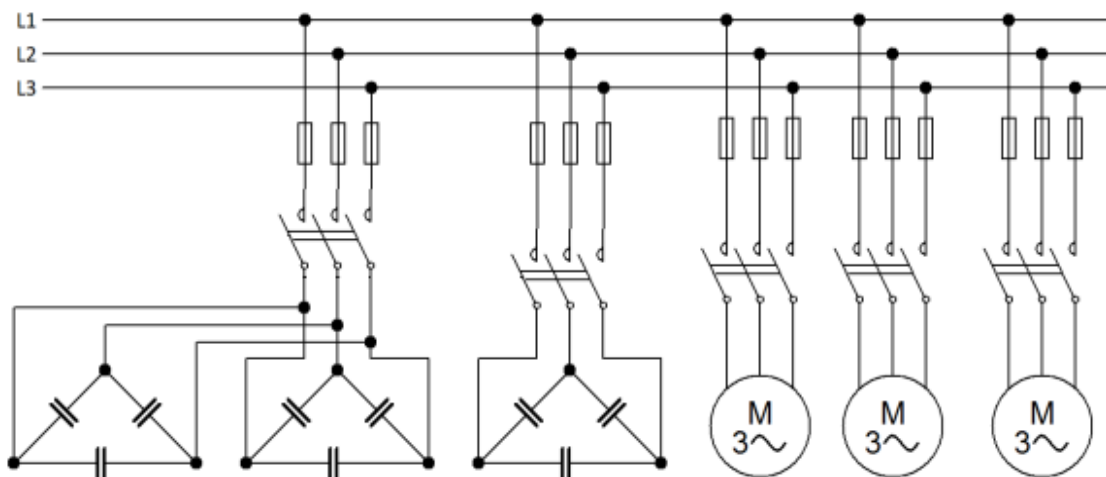


Obr. 4.4. Schéma zapojení skupinové kompenzace [7]

#### 4.2.3 Centrální kompenzace

Centrální kompenzace je podobná jako skupinová kompenzace s tím rozdílem, že centrální kompenzace je umístěna v hlavním rozvaděči, a tak kompenzuje celý závod najednou. Zapínání a vypínání kondenzátoru se reguluje automaticky pomocí regulátorů jalového výkonu.

Nevýhodou této kompenzace je nevykompenzovaný rozvod uvnitř závodu.



Obr. 4.5. Schéma zapojení centrální kompenzace [7]

### 4.3 Chráněná (hrazená) kompenzace

Vývoj moderní polovodičové techniky vedl ke zvýšení počtu nelineárních zátěží v sítích, které negativně ovlivňují jejich parametry.

Významnou vlastností kondenzátorů je totiž frekvenční závislost reaktance. Kapacitní reaktance klesá se zvyšujícím se kmitočtem (vzorec 4.11). Celková efektivní hodnota proudu protékajícího kondenzátorem vzroste působením harmonických a tento proud pak bude přetěžovat nejenom samotný kondenzátor, ale i části sítě mezi zdrojem harmonických a kondenzátorem.

Reaktance kondenzátorů:

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad [\Omega] \quad (4.11)$$

Indukčnost transformátoru (tlumivka) společně s kondenzátory vytváří při jejich zapojování pro kompenzaci rezonanční obvod. Tento rezonanční obvod má rezonanční frekvenci (vzorec 4.12), a pokud je harmonický proud blízko této frekvence, uvede se obvod do rezonančního stavu. V rezonančním stavu bude obvodem procházet vysoký proud, který jej bude přetěžovat.

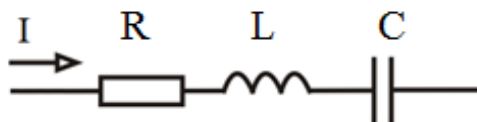
$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{C \cdot L}} \quad [\text{Hz}] \quad (4.12)$$

Kompenzace účinníku s přidáním tlumivky je metoda odstraňující hrozby vzniklé z rezonančního stavu pomocí posunu rezonanční frekvence, aby byla v dostatečné vzdálenosti pod frekvencí nejnižšího řádu vyšší harmonické, která je v síti dominantní. Tak je zabráněno, že nevznikne maximální průchod proudu.

Chráněná kompenzace se nemusí použít v takových sítích, kde podíl instalovaného výkonu nelineárních spotřebičů činí cca 10 až 15 %. [10]

#### 4.3.1 Návrh chráněné (hrazené) kompenzační sekce

V chráněné (hrazené) kompenzační sekci je sériově zapojená tlumivka s kondenzátorem tvořící rezonanční RLC obvod (obr. 4.6) pracující jako širokopásmový filtrační obvod pro harmonické nad rezonančním kmitočtem obvodu. Tím zabraňuje vzniku rezonančních jevů, které by měly za následek snížení životnosti kondenzátorů nebo poškození citlivějších spotřebičů. Výhodou tlumivky je, že omezují amplitudu proudových rázů vznikajících při spínání kondenzátorů. [10,11]



Obr. 4.6 RLC zapojení

Rezananční frekvence tlumivky a kondenzátoru je záměrně volena tak, aby nedocházelo k rezonanci na nějaké charakteristické harmonické a tím k přetěžování kondenzátoru. Tento rezonanční obvod je charakterizován činitelem útlumu  $p$ , který odpovídá vztahu:

$$p = \frac{X_L}{X_C} \cdot 100 = \left( \frac{f_n}{f_r} \right)^2 \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.12)$$

Nejčastěji se setkáváme s rezonanční frekvencí (jmenovitým kmitočtu 50 Hz) v třetí harmonické 150 Hz (činitel zatlumení 14%), a v páté harmonické 250 Hz ( $p=7\%$ ).

Při zapojení tlumivky dochází ke zvýšení napětí na kondenzátoru. Z tohoto důvodu je nutné volit kondenzátor s vyšším jmenovitým napětím, než je napájecí napětí sítě. Napájecí napětí kondenzátoru se vypočte podle vztahu:

$$U_C = \frac{U}{1 - \frac{p}{100}} \quad [\text{V}] \quad (4.13)$$

Reaktance kompenzačního obvodu:

$$X_{LC} = (1 - p) \cdot X_C \quad [\Omega] \quad (4.14)$$

Ze vzorce (4.14) můžeme zjistit skutečný jalový výkon chráněné kompenzace:

$$Q_{LC} = \frac{U_s^2}{X_{LC}} \quad [\text{var}] \quad (4.15)$$

Při změně napětí na kondenzátorech se změní kapacita kondenzátorů:

$$C = \frac{I}{U_C \cdot \omega} \quad [\text{F}] \quad (4.16)$$

Induktivní reaktanci vypočítáme pomocí kapacitní reaktance a činitele tlumení:

$$X_L = p \cdot X_C \quad [\Omega] \quad (4.17)$$

Vypočet indukčnosti tlumivky k vybranému kondenzátoru:

$$L = \frac{X_L}{\omega} \quad [\text{H}] \quad (4.18)$$

#### 4.3.2 Kompenzační filtry

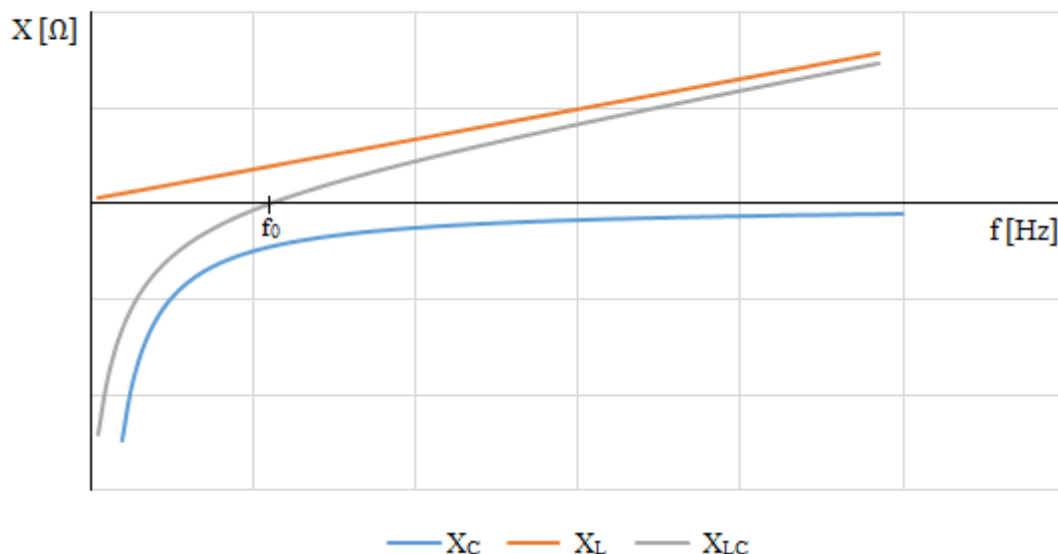
Kompenzační filtr je sériový rezonanční LC obvod. Používá se pro filtraci harmonických proudů, vznikajících na různých zařízeních připojených na síť. Takovéto zařízení můžeme řešit pomocí několika samostatných LC obvodů naladěných na jednotlivé harmonické. V praxi se toto řešení využívá nejčastěji. Analýzy energetického rušení v síti jsou nejčastějším podkladem pro návrh kompenzačních filtrů. [11]

Sériový LC obvod je v sítích nn naladěn na rezonanční frekvenci, při které má minimální impedanci. Tyto LC obvody se připojují k rozvodové soustavě co nejblíže místu vzniku harmonických frekvencí a zásadně paralelně. Eliminaci harmonických složek proudu pomocí kompenzačního filtru se také sníží obsah harmonických napětí a také se tím zlepší i kvalita síťového napětí.

Kompenzační filtr tvoří sériový RLC obvod, kde ztrátová složka R představuje sériový odpor. Impedance obvodu je:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad [\Omega] \quad (4.19)$$

## Závislost impedance na kmitočtu



Obr. 4.7 Impedance LC na frekvenci

Pro frekvence menší než rezonanční ( $f_0$ ) se kompenzační filtr chová jako kapacita a pro 1. harmonickou kompenzuje jalový výkon. Kompenzační filtr se chová jako zkrat pro rezonanční frekvenci, na kterou je nalaďen a pro vyšší frekvence má induktivní charakter.

Obvodem prochází proud závislý na frekvenci:

$$I_0 = \frac{U}{Z_0} \quad [\Omega] \quad (4.20)$$

## 4.4 Řízení kompenzace

Snažíme se docílit toho, aby velikost kompenzačního výkonu co nejvíce odpovídala velikosti, kterou v danou chvíli potřebujeme, z důvodu, aby byla kompenzace co nejúčinnější. Potřebný kompenzační výkon se mění se změnami zatížení, pokud použijeme skupinovou nebo centrální kompenzaci. Z tohoto důvodu je nutno kompenzaci regulovat neboli řídit.

### 4.4.1 Stupňovité řízení kompenzace

Zařízení se stupňovitým řízením kompenzace mívá různý počet a velikost jednotlivých stupňů. Počet a velikosti stupňů jsou důležitou volbou pro kompenzační zařízení. Důležitost této volby platí pro kompenzaci nízkého i vysokého napětí a stejně tak u kontaktních i nekontaktních kompenzačních zařízení. Samotná volba závisí především na potřebném kompenzačním výkonu a zadané hodnotě k vykompenzování. [11]

$$N \geq \frac{Q_L - P \cdot \tan \varphi}{Q_{C1}} \quad [-] \quad (4.21)$$

Velikost kompenzačního stupně:

$$Q_{C1} = P_{min} \cdot \tan \varphi \quad [\text{var}] \quad (4.22)$$

#### 4.4.1.1 Kontaktní spínání

Regulované kontaktní kompenzátory pracují na principu přepínání kompenzačních sekcí. Používají se v sítích, kde se nevyskytují harmonické složky proudu a kde nejsou kladeny nároky na rychlost kompenzace.

Při použití klasických stykačů je velkým nedostatkem vznik přechodových dějů, které mají za následek velké proudové rázy. Mohou dosahovat až třicetinásobku jmenovitého proudu a způsobit i vznik rušivých jevů při sepnutí. Tyto nevýhody lze odstraňovat předřazením ochranných tlumivek, a především použitím stykačů s odporovým spínáním.

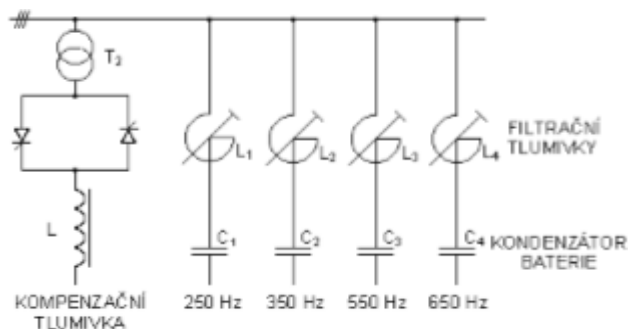
#### 4.4.1.2 Bezkontaktní spínání

Používá se tam, kde klademe větší nároky na rychlost změny jalového výkonu. Místo stykačů se použijí bezkontaktní spínače (tyristory). Současně je nutné použití rychlého regulátoru jalového výkonu, protože rychlost spínání je zde omezena pouze rychlostí regulátorů. Kondenzátorům se zde zpravidla předřazují ochranné tlumivky, aby se zamezilo přechodovým jevům a proudovým rázům při přepnutí kondenzátoru na síť, aby nedošlo ke zničení polovodičového spínače.

Bezkontaktní spínání je tvořeno dvojicí antiparalelních tyristorů, které spínají tyristor při průchodu nulou, tedy synchronně se sítí. Tento požadavek společně s požadavky na rychlost spínání a opakování sepnutí kondenzátorů i částečně nebo plně nabitých ztěžuje provedení řídicích obvodů.

#### 4.4.2 Plynulé řízení kompenzace

Nyní patří mezi technicky nejdokonalější kompenzační prostředky. Tvoří je několik trvale připojených kompenzačních filtrů, k nimž je připojena kompenzační tlumivka. Velikost kompenzačního výkonu nelze měnit připojením nebo odpojením kapacity kondenzátoru, neboť by došlo k rozladění LC obvodu. Výsledný kompenzační výkon je regulován pomocí kompenzační tlumivky, pomocí tlumivky můžeme kompenzační výkon pouze snížit. [11,12]



Obr. 4.8 Plynulé řízené kompenzace

## 5 NOVÉ ZAŘÍZENÍ PRO KOMPENZACI

### 5.1 Aktivní filtry

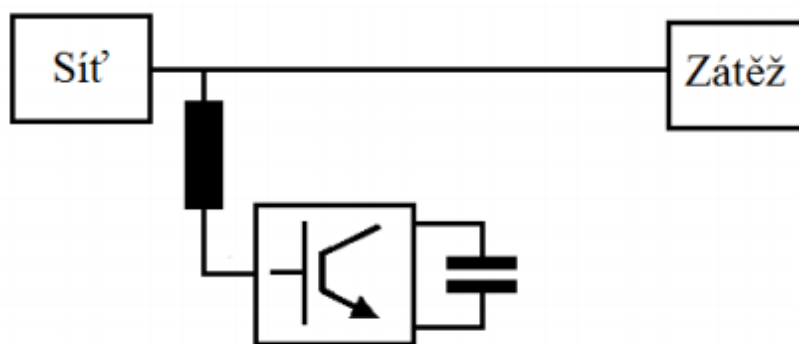
Nejnovější metoda, jak efektivně omezit vliv vyšších harmonických frekvencí v síti na rozdíl od pasivních kompenzačních filtrů, jsou aktivní kompenzační filtry. Aktivní filtr je tvořen generátorem, který vyhlazuje sinusové složky základního kmitočtu působením proti harmonickým složkám proudu nebo napětí. Aktivní filtry se dělí na paralelní, sériové a kombinované na základě způsobu připojení k síti. Jejich hlavní výhodou je především dynamika a rychlost. Aktivní filtry se používají především ke kompenzaci měniče používaného pro řízení velkých točivých strojů s malou spotřebou jalového výkonu. Dále v nízkonapětových rozvodech, kde je množství úsporných žárovek a výpočetní technika. V průmyslu se využívají pro průmyslové sítě, které mají vyšší podíl řízení pohonu. [12]

#### 5.1.1 Paralelní aktivní filtr

Toto zařízení, umožňuje filtraci nežádoucích harmonických proudu a k tomu kompenzuje jalový proud. Generátor upravuje proud tím způsobem, že zavádí shodnou opačnou složku proudu k vyšším harmonickým do sítě. Dochází k odečtení generovaného proudu a proudu vyšších harmonických a výsledný proud je potom zbaven zvolených harmonických. Takto je možné v jakémkoli okamžiku uskutečnit selektivní kompenzaci podle okamžitého výskytu harmonických složek bez nebezpečí nežádoucí rezonance.

Paralelní aktivní filtr je schopen generováním jalové složky první harmonické v proudu provádět velmi rychlou a dynamickou kompenzaci jalového proudu, popřípadě sousledných a nesousledných složek upravovat nesymetrickou zátěž na symetrickou. Pomocí řídicích algoritmů lze měnit filtrační a kompenzační vlastnosti.

Generátor proudu či napětí je tvořen můstkovým zapojením polovodičových spínačů (IGBT), zdrojem energie (kondenzátor) a regulátorem. Na tyto prvky jsou kladeny velké nároky z hlediska rychlostí.



Obr. 5.1 Schéma paralelní aktivní filtr [12]

Paralelní aktivní filtr upravuje vlastnosti sítě směrem od zátěže ke zdroji a vyrovnává rušivé účinky zátěže.

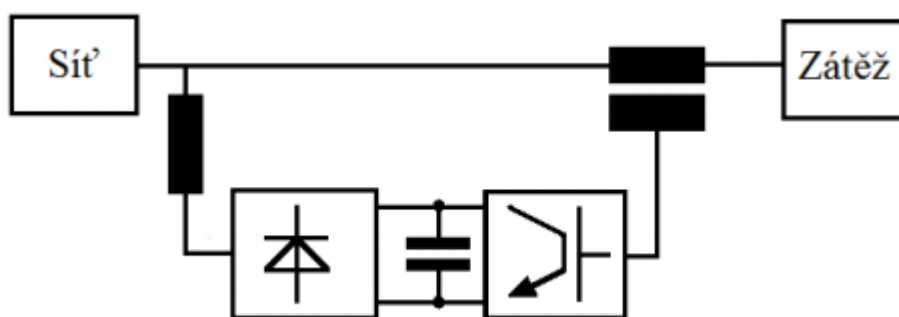


### 5.1.1.1 Návrh paralelního aktivního filtru

Při návrhu paralelních aktivních filtrů se z pravidla vyplácí sestavit zařízení splňující požadavky zákazníka. Konkrétní druh filtru závisí na charakteru filtrované zátěže, které je přizpůsoben i řídicí algoritmus. Na základě daného algoritmu může filtr provádět libovolný z následujících úkolů, a to i v jakékoliv kombinaci: kompenzace jalového proudu, vyvážení proudu nesymetrické zátěže, kompenzace proudu nulovým vodičem, selektivní filtrace zvolených harmonických proudů, filtrace harmonických proudů. [12]

### 5.1.2 Sériový aktivní filtr

Sériový aktivní filtr je tvořený generátorem napětí a umožňuje tak udržovat amplitudu napětí, kompenzovat poklesy i špičky, odstraňovat harmonické a zajišťovat symetrické rozložení napětí. Může také dodávat energii při výpadku napájecího napětí za podmínky, že je filtr napájen z jiného zdroje než zátěž.



Obr. 5.2 Schéma sériový aktivní filtr [12]

Sériové aktivní filtry upravují síť směrem od napájecí strany ke spotřebiči, dodávají zátěži kvalitnější napětí.

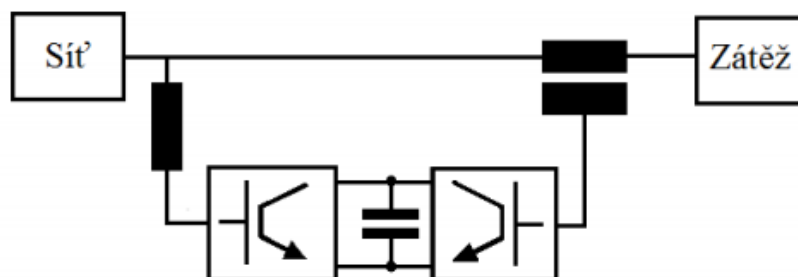
#### 5.1.2.1 Návrh sériového aktivního filtru

Sériové aktivní filtry slouží k vylepšování kvality napětí, které se připojuje na zátěž citlivou na kvalitu napájení. Koncepce sériových aktivních filtrů vychází z požadavků na jejich použití. V současné době jsou tato zařízení používána pro citlivá elektrická zařízení v síti, například řídicí systémy v průmyslových sítích.

V dnešní době se také vyvíjí řada sériových aktivních filtrů, které budou pracovat pro vylepšování napětí v rozvodných sítích nízkého napětí. Budou sloužit pro stabilizaci napětí, kde nejde dodržet tolerance napájecího napětí. [12]

### 5.1.3 Kombinovaný aktivní filtr

Paralelní a sériový aktivní filtr je možné spojit v jeden aktivní filtr, který bude zajišťovat vhodné napětí v místech připojení filtru a také definovaný průběh odebíraného proudu.



Obr. 5.3 Schéma kombinovaného aktivního filtru [12]

#### 5.1.4 Účinnost filtru

Aktivní filtr je podobně jako pasivní filtr spotřebičem jalového výkonu, který se vyměňuje mezi filtrem a sítí. Pro pokrytí ztrát na spínacích prvcích a ztrát vstupního filtru je však potřeba i činný výkon.

Cílem přístroje je odstranit deformační a eventuálně i jalový výkon zátěže. U každého zařízení je snaha vyjádřit jeho účinnost. Tu však lze nejlépe vyjádřit tam, kde se přeměňuje energie z jedné formy na jinou. U aktivního filtru je všechna energie spotřebována na ztráty, a proto nelze hovořit o účinnosti v běžném smyslu.

$$\eta = \frac{S_{\text{filtru}} - P_{\text{filtru}}}{S_{\text{filtru}}} * 100 \quad [\%] \quad (4.21)$$

Vzorec (4.21) nám říká, jak velká bude účinnost aktivního filtru. Je to poměr užitečného zdánlivého výkonu k celkovému výkonu, tato účinnost se pohybuje v rozhraní 93 - 97 % v závislosti na celkovém výkonu. [12]

#### 5.1.5 Využití aktivních filtru

Výkon, který by se měl u aktivního filtru udávat jako zdánlivý, je možno uživatelem rozdělit na dvě části. První část se spotřebuje na kompenzaci výkonu deformačního a druhá část pro kompenzaci výkonu jalového. Toto rozdělení umožňuje řídicímu systému aktivního filtru libovolně zvolit velikosti výkonů.

Výkon aktivního filtru proto nelze jednoduše porovnat s výkonem běžných kompenzátorů jalového výkonu. Použití aktivního filtru převážně nebo pouze na kompenzaci jalového výkonu je přepych. Aktivní filtr je vhodné použít právě na kompenzaci deformačního výkonu. [12]

V poslední kapitole jsme počítali příklad. Celkový výkon byl 159 kW. Deformace proudu je např. od 5 a 7 harmonické asi 25 %, pak je zřejmé, že aktivního filtru by měl mít kolem 40 kVA a bude ze sítě odebírat prakticky sinusový proud. Většinou není nutno odstraňovat harmonické v plném rozsahu. Z předcházejícího vysvětlení je jasné, že pro dimenzování aktivních filtrů nelze vycházet ze současných fyzikálních představ klasických kompenzátorů jalového výkonu.

#### 5.1.6 Kombinace aktivních filtrů a klasické kompenzace

Aktivní filtry se v dnešní době vzájemně kombinují. Nejčastěji se nabízí použít kompenzátor pomalejší kontaktní s chráněnými sekcemi a výkon aktivního filtru použít hlavně pro vykompenzování deformačního výkonu.

## 6 VÝPOČET

Údržbářská dílna v průmyslovém závodu je napájena ze sítě 22kV, která je snížena transformátorem na 400/320 V. Tuto síť napájí celkem 5 motorů, které mají různé výkony, a to 2 motory po 22kW při účinníku 0,78, 2 motory po 30kW při účinníku 0,89 a jeden motor 55kW s účinníkem 0,88. Motory budou napájeny z frekvenčních měničů. [4]

### 6.1 Návrh kompenzace

Z důvodu, že motory jsou ovládané pomocí frekvenčního měniče nastává v obvodu výskyt více harmonických, především 5. a 7. Kvůli těmto harmonickým by měla být kompenzace hrazená, aby neohrožovaly kompenzační zařízení i vlastní spotřebiče. Kompenzace bude tedy hrazená a centrální.

V prvním kroku vypočítáme výkon všech (pěti) motorů, a to jak činný, tak jalový

Celkový výkon činný:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 22 + 22 + 30 + 30 + 55 = 159kW$$

Celkový jalový výkon:

$$Q_{1,2} = P_{1,2} * tg(\varphi) = 22 * tg(\arccos(0,78)) = 17,65kvar$$

$$Q_{3,4} = P_{3,4} * tg(\varphi) = 30 * tg(\arccos(0,89)) = 15,37 kvar$$

$$Q_5 = P_5 * tg(\varphi) = 55 * tg(\arccos(0,88)) = 29,685 kvar$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = 17,65 + 17,65 + 15,37 + 15,37 + 29,685 = 95,72 kvar$$

Celková velikost kondenzátorové baterie při účinníku 0,97:

$$S = \frac{P}{\cos(\varphi)} = \frac{159}{0,97} = 163,91 kVA$$

$$Q_{k1} = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{163,91^2 - 159^2} = 39,82 kvar$$

$$Q_k = Q - Q_{k1} = 95,72 - 39,82 = 55,9 kvar$$

Z výpočtu vidíme, že potřebujeme 55,9 kvar, při zapnutých všech pěti motorech na kompenzovaný účinník  $\cos 0,97$ . Kompenzovaný výkon si rozdělíme do 5 stupňů po 3 x 8 kvar a 2 x 20 kvar.

**Parametry pro stupně kondenzátoru a tlumivky po 8 kvar:**

Kvůli tlumivce se nám zvětší napětí na kondenzátoru.

$$U_C = \frac{U}{1 - \frac{p}{100}} = \frac{400}{1 - \frac{7}{100}} = 430,11V$$

Napětí vzrostlo na 430,11 V, takže musíme vybrat z katalogu kondenzátorů na napěťovou hladinu 430 a vyšší.

Skutečný výkon bude nižší, a to kvůli tlumivce.

$$Q_{LC} = \frac{U^2}{\left(1 - \frac{p}{100}\right) * \frac{U_c^2}{Q}} = \frac{400^2}{\left(1 - \frac{7}{100}\right) * \frac{430^2}{8}} = 7,44 \text{ kvar}$$

Reaktance kondenzátoru:

$$X_C = \frac{U_c^2}{Q_C} = \frac{430^2}{8000} = 23,11 \Omega$$

Z reaktance kondenzátoru a z činitele tlumení lze vypočítat induktivní reaktanci:

$$X_L = X_C * p = 23,11 * 0,07 = 1,61 \Omega$$

Kapacita kondenzátoru:

$$C = \frac{1}{\omega * X_C} = \frac{1}{100\pi * 23,11} = 137,74 \mu F$$

Indukčnost tlumivky:

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{1,61}{100\pi} = 5,12 \text{ mH}$$

Proud tekoucí přes stupeň kompenzace:

$$I_{LC} = \frac{Q_{LC}}{\sqrt{3} * U} = \frac{7,44 * 10^3}{\sqrt{3} * 400} = 10,74 \text{ A}$$

Jištění kondenzátoru:

$$I = 1,8 * I_{LC} = 1,8 * 10,74 = 19,33 \text{ A}$$

Pro jištění kondenzátoru budeme potřebovat pojistky velikosti 20 A gG

Z vypočítaných hodnot určíme typ tlumivky a kondenzátoru z katalogu. Nejvhodnější typ kondenzátoru je od firmy Zez-silko a to CSADG 1-0,44/8. Jmenovité parametry kondenzátoru jsou: napětí 440 V, proud 10,5 a kapacita 3x43,8μF. Firma Zez-silko nám nabízí ke kondenzátoru tlumivku s označením TKC1-8-189/400/440 a jmenovitými parametry: indukčnost 5,39mH a proud 10,3 A.

**Parametry pro stupně kondenzátoru a tlumivky pro 20 kvar:**

Výpočet je podobný jako u 8kvar.

Napětí na tlumivce.

$$U_C = \frac{U}{1 - \frac{p}{100}} = \frac{400}{1 - \frac{7}{100}} = 430,11 \text{ V}$$

Napětí vzrostlo na 430,11 V, takže musíme vybrat z katalogu kondenzátorů na napěťovou hladinu 430 a vyšší.

Skutečný výkon bude nižší, a to kvůli tlumivce.

$$Q_{LC} = \frac{U^2}{\left(1 - \frac{p}{100}\right) * \frac{U_c^2}{Q}} = \frac{400^2}{\left(1 - \frac{7}{100}\right) * \frac{430^2}{20000}} = 16,8 \text{ kvar}$$

Reaktance kondenzátoru:

$$X_C = \frac{U_c^2}{Q_C} = \frac{430^2}{20000} = 9,25 \Omega$$

Z reaktance kondenzátoru a z činitele tlumení lze vypočítat induktivní reaktanci:

$$X_L = X_C * p = 9,245 * 0,07 = 0,647 \Omega$$

Kapacita kondenzátoru:

$$C = \frac{1}{\omega * X_C} = \frac{1}{100\pi * 9,23} = 344,45 \mu F$$

Indukčnost tlumivky

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{0,647}{100\pi} = 2,06 \text{ mH}$$

Proud tekoucí přes stupeň kompenzace:

$$I_{LC} = \frac{Q_{LC}}{\sqrt{3} * U} = \frac{16,8 * 10^3}{\sqrt{3} * 400} = 24,25 \text{ A}$$

Jištění kondenzátoru:

$$I = 1,8 * I_{LC} = 1,8 * 24,25 = 43,65 \text{ A}$$

Pro jištění kondenzátoru budeme potřebovat pojistky velikosti 50 A gG

Z vypočítaných hodnot určíme typ tlumivky a kondenzátoru z katalogu. Nejvhodnější typ kondenzátoru je také od firmy Zez-silko a to CSADG 1-0,44/20 jmenovité parametry kondenzátoru jsou: proud 26,2 A a kapacita 3x111 μF. Firma Zez-silko nám nabízí také ke kondenzátoru tlumivku označení TKC1-8-189/400/440 s jmenovitými parametry: indukčnost 2,17 mH a proud 25,6 A.

### Výběr ovládacích prvků

Pro řízení jalového výkonu byl vybrán typ Novar 1106/1114 z firmy Zez-silko, který je plně automatický přístroj umožňující optimální řízení kompenzace jalového výkonu. Taký je vybaven přesnými měřicí napětí a proudů.



*Obr.6.1 Novar 1106/1114 [13]*

Pro spínání kondenzátoru je vhodný typ pro 8kvar K3-18K10230 a pro 20kvar K3-24K00230 z firmy Zez-silko.

## 7 ZÁVĚR

Kompenzace jalového výkonu je a nadále i bude aktuální problematikou jak pro většinu průmyslových odběratelů, tak i pro distributory elektrické energie. Ze strany odběratelů se jedná o snížení ekonomických nákladů za elektřinu při dodržení účinníku v požadovaných mezích. U distributorů jde hlavně o technické problémy vznikající nekompenzovanými odběry a z toho vyplývající ekonomická stránka věci, ať už se jedná o ztráty na vedení nebo neefektivní využití transformátorů.

V poslední kapitole je vypočítán krátký příklad na kompenzaci jalového výkonu průmyslové sítě s pěti motory. Vypočtený výkon kompenzačního zařízení byl 55,9kvar pro kompenzační účinník  $\cos\varphi = 0,97$ . Dále byl kompenzační výkon rozdělen do pěti chráněných sekcí, pro každou jednotlivou sekci byla vypočítána velikost kompenzačních baterií, ochranných tlumivek, pojistek a stykačů, které byly následně vybrány z katalogů výrobců.

Takže jak můžeme vidět, kompenzace je důležitou součástí našeho života.

## Seznam obrázku

<i>obr.2.1 Paprsková síť, paprskový (vlevo), dvojpaprskový (vpravo) [9]</i> .....	13
<i>obr.2.2 Okružní síť [9]</i> .....	13
<i>obr.2.3 Zjednodušená mřížková síť [9]</i> .....	14
<i>obr.2.4 Klasická mřížková síť [9]</i> .....	15
<i>obr.2.5 Druhy uzemnění transformátoru pro síť VVN/VN</i> .....	17
<i>obr.3.1 Fázový diagram stanovení kompenzačního výkonu [3]</i> .....	18
<i>obr.3.2 Vliv kompenzace [6]</i> .....	19
<i>obr.3.3 Náhradní schéma sériové kompenzace</i> .....	20
<i>obr.3.4 Fázový diagram sériové kompenzace</i> .....	20
<i>obr.3.5 Náhradní schéma paralelní kompenzace</i> .....	21
<i>obr.3.6 Fázový diagram paralelní kompenzace</i> .....	21
<i>obr.4.1 V-křivky synchronního stroje [2]</i> .....	23
<i>obr.4.2 Zapojení do hvězdy (vlevo) a do trojúhelníku (vpravo) [2]</i> .....	24
<i>obr.4.3 Připojení kompenzačních kondenzátorů k motoru nn a vn [7]</i> .....	26
<i>obr.4.4 Schéma zapojení skupinové kompenzace [7]</i> .....	27
<i>obr.4.5 Schéma zapojení centrální kompenzace[7]</i> .....	27
<i>obr.4.6 RLC zapojení</i> .....	28
<i>obr.4.7 Impedance LC na frekvenci</i> .....	30
<i>obr.4.8 Plynule řízené kompenzace</i> .....	31
<i>obr.5.1 Schéma paralelní aktivní filtr [12]</i> .....	32
<i>obr.5.2 Schéma sériový aktivní filtr [12]</i> .....	33
<i>obr.5.3 Schéma kombinovaného aktivního filtr [12]</i> .....	33
<i>obr.6.1 Novar 1106/1114 [13]</i> .....	37



## **Seznam tabulek**

<i>tab.2.1 Rozdělení sítí podle jednotlivých napěťových úrovní.....</i>	<i>12</i>
---	-----------

## Seznam literatury

- [1] ŠTROBLOVÁ, Milada a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Elektrické sítě městské a průmyslové*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994. ISBN 80-7082-154-X.
- [2] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [3] SANTARIUS, Pavel. *Elektrické stanice a vedení*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1990. ISBN 80-7078-032-0.
- [4] HORÁK, Karel. *Výpočet elektrických sítí*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1980.
- [5] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektroenergetika II: zkrat, přepětí, stabilita, průmyslová energetika*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1993. ISBN 80-7078-195-5.
- [6] Průmyslová energetika. Kompenzace účinku v průmyslových sítích. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~tesarova/PE/Soubory/Kap7.pdf>
- [7] ČSN 33 3080 Kompenzace indukčního výkonu statickými kondenzátory
- [8] HODINKA, Miloslav, Štefan FECKO a František NĚMEČEK. *Přenos a rozvod elektrické energie*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00065-3.
- [9] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektroenergetika [Hradílek, 1992, záznam a]*. Ostrava: Vysoká
- [10] Základy kompenzace. chráněna kompenzace [online]. [cit. 2017-01-13]. Dostupné z: <http://www.kbh.cz/o-kompenzacichranena-kompenzace>
- [11] Kompenzace jalové energie a filtrace energetického rušení: kompenzace jalové energie [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <http://www.emgzlin.cz/menu/kompenzace-o-kompenzacichranena-kompenzace>
- [12] KORENC, Vladimír a Jiří HOLOUBEK. *Kompenzace jalového výkonu v praxi*. Praha: IN-EL, 1999. ISBN 80-86230-07-4.
- [13] Výrobce kompenzační techniky: ZES-SILKO Power Capacitors [online]. [cit. 2016-03-22]. Dostupné z: <http://www.zez-silko.cz/>